



## **PROYECTO FIN DE MASTER**

MASTER EN INGENIRÍA AMBIENTAL

Evaluación de la descarga difusa de aguas subterráneas al mar mediante imágenes satelitales Landsat 8.

Autor: Walter E. Cabana Monzón

Directores: Albert Folch Sancho

Sonia Jou Claus

Barcelona, 14 de junio del 2019.

## RESUMEN

En la actualidad la descarga de agua subterránea al mar (SGD por sus siglas en inglés), sigue siendo un proceso poco comprendido y a menudo no se toma en cuenta en programas de manejo y monitoreo costero, ya que no se la reconoce como una fuente potencial de nutrientes para su monitoreo respectivo. Esto se debe a que la descarga de agua subterránea es una fuente esencialmente invisible, lo que hace que la localización y cuantificación sea un desafío. Por lo expuesto se presenta una metodología integral y completamente gratuita, basada en la utilización de imágenes térmicas (banda 10) del satélite Landsat 8. Con la finalidad de facilitar la evaluación de la SGD, se han realizado medidas estadísticas de rango y desviación estándar a lo largo de la zona costera de Castellón y Catalunya en España. El objetivo principal de este trabajo es valorar el potencial de la imagen térmica para localizar zonas de SGD en diferentes contextos hidrogeológicos del Mediterráneo.

La metodología aplicada se dividió en tres etapas. La primer etapa: consistió en la adquisición de las imágenes térmicas, disponibles en el servidor USGS (Servicio geológico de Estados Unidos) de la NASA para los periodos 2014-2018 (24 imágenes en total). Las imágenes adquiridas fueron procesadas mediante Qgis. El procesado consistió en la conversión de temperatura de brillo a Celsius y posteriormente se eliminó la superficie terrestre, para así obtener las imágenes correspondientes a la temperatura superficial del mar (SST). La segunda etapa: consistió en el cálculo de las medidas estadísticas de rango y desviación estándar a partir de un set de imágenes ordenadas. Se propuso también pre-filtrar las imágenes partiendo de un set de 14 imágenes y proseguir con 9 y 5 imágenes considerando que estas muestren datos y/o indicios de SGD, eso con la finalidad de localizar las potenciales zonas de SGD. En esta etapa, también se procedió a medir las zonas de SGD localizadas con la herramienta IDENTIFY de ArcGIS, con la finalidad de analizar la dispersión de datos en las SGD localizadas. En la tercera y última etapa: se contextualizó hidrogeológicamente las diferentes SGD localizadas, mediante las fichas de las masas de agua del ACA (Agencia Catalana del Agua).

El cálculo de las medidas estadísticas de rango y desviación estándar, permitió localizar 12 zonas de SGD, cinco de las zonas localizadas ya estaban descritas en la bibliografía, lo cual permitió contrastar los resultados de este trabajo. Tras medir las zonas de SGD localizadas, se obtuvo valores bajos, medios y altos en la dispersión de datos. Para el caso del rango, mencionados valores oscilaron entre 0.2 a 0.3 °C, 0.3 a 0.5 °C y 0.5 a 3.8 °C respectivamente, los cuales se reflejaron en la SGD difusa, SGD con pluma ligeramente definida y SGD con pluma definida. Para el caso de la desviación estándar los valores bajos, medios y altos oscilaron entre 0.1 a 0.2 °C, 0.2 a 0.3 °C y 0.3 a 1.1 °C, como en el caso anterior estos valores se reflejaron en la SGD difusa, SGD con pluma ligeramente definida y SGD con pluma definida respectivamente. Cabe indicar que los valores en mención, muestran también relación directa con los caudales de descarga bajos, medios y altos. Los cuales se presentaron en acuíferos poco productivos, medianamente productivos y muy productivos respectivamente.

En un sentido analítico, la dispersión de datos fue lo que permitió la localización de las zonas de SGD. Para el caso del rango; el valor mínimo a partir del cual se pudo visualizar zonas de SGD fue de 0.2 °C hasta un máximo de 3.8 °C. Para la desviación estándar; el valor mínimo fue de 0.1 °C hasta un máximo de 1.1 °C, destacando que esta medida es la más idónea para localizar zonas de SGD, ya que permitió visualizar SGD, con una dispersión de datos menor a la del rango.

## ABSTRACT

At present, the discharge of groundwater to the sea (SGD by its acronym in English), is still a little understood and often is not taken into account in coastal management and monitoring programs, as it is not recognized as a potential source of nutrients for their respective monitoring. This is because the groundwater discharge is an essentially invisible source, which makes localization and quantification a challenge. Therefore, an integral and completely free methodology is presented, based on the use of thermal images (band 10) of the Landsat 8 satellite. In order to facilitate the evaluation of the SGD, statistical measurements of range and standard deviation have been made. along the coastal area of Castellón and Catalunya in Spain. The main objective of this work is to assess the potential of the thermal image to locate SGD zones in different hydrogeological contexts of the Mediterranean.

The applied methodology was divided into three stages. The first stage: consisted in the acquisition of thermal images, available on NASA's USGS (US Geological Service) server for the periods 2014-2018 (24 images in total). The acquired images were processed by Qgis. The processing consisted of the conversion of brightness temperature to Celsius and subsequently, the earth's surface was eliminated, in order to obtain the images corresponding to the sea surface temperature (SST). The second stage: consisted of the calculation of the statistical measures of rank and standard deviation from a set of ordered images. It was also proposed to pre-filter the images starting from a set of 14 images and proceed with 9 and 5 images considering that these show data and/or indications of SGD, that with the purpose of locating the potential areas of SGD. In this stage, we also proceeded to measure the areas of SGD located with the IDENTIFY tool of ArcGIS, that with the purpose of analyzing the dispersion of data in the located SGDs. In the third and final stage: the different localized SGDs were contextualized hydrogeologically, by means of the tokens of the bodies of water of the ACA (Catalan Water Agency).

The calculation of the statistical measures of rank and standard deviation allowed locating 12 areas of SGD, five of the localized areas were already described in the bibliography, which allowed to contrast the results of this work. After measuring the localized SGD zones, low, medium and high values were obtained in the data dispersion. In the case of the range, these values oscillated between 0.2 to 0.3 ° C, 0.3 to 0.5 ° C and 0.5 to 3.8 ° C respectively, which were reflected in the diffuse SGD, SGD with slightly defined pen and SGD with a defined pen. For the case of the standard deviation, the low, medium and high values ranged between 0.1 to 0.2 ° C, 0.2 to 0.3 ° C and 0.3 to 1.1 ° C, as in the previous case these values were reflected in the diffuse SGD, SGD with lightly defined pen and SGD with defined pen respectively. It should be noted that the values in question, also show a direct relationship with the discharge flows low, medium and high. These were presented in aquifers that were not very productive, moderately productive and highly productive, respectively.

In an analytical sense, the dispersion of data was what allowed the location of SGD areas. For the case of the rank; the minimum value from which it was possible to visualize SGD zones was from 0.2 ° C to a maximum of 3.8 ° C. For the standard deviation; the minimum value was 0.1 ° C up to a maximum of 1.1 ° C, highlighting that this measure is the most suitable for locating SGD zones, since it allowed to visualize SGD, with a data dispersion lower than that of the range.

## AGRADECIMIENTOS

A quienes cuando me caí, me ensañaron a levantarme; los mismos que cuando falle tuvieron el bien de enseñarme que era parte del camino para el éxito, ellos, quienes me abrazaron, me procuraron y amaron; mis padres que en tanto tiempo ni una vez me han fallado, a ellos les debo todo lo que soy y seré, a ustedes Filomena y Rigoberto les dedico el primer y todos mis logros.

Agradezco a mis tutores Albert Folch y Sonia Jou que han dirigido este trabajo de fin de máster, por todo el tiempo dedicado en la enseñanza de nuevos conocimientos y las correcciones del presente trabajo.

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Descarga de aguas subterráneas al mar .....	1
1.2 Imágenes Térmicas.....	2
1.3 Planteamiento del problema y objetivos .....	2
2. ÁREA DE ESTUDIO .....	3
2.1 Contexto geográfico y geológico .....	3
2.2 Hidrogeología .....	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
3.1 Materiales .....	5
3.1.1 Datos .....	5
3.1.2. Datos secundarios y software .....	5
3.2 Métodos .....	6
3. 2.1 Cálculo de temperatura de brillo en Celsius .....	6
3.2.2 Calculo de medidas estadísticas.....	8
3.2.3 Contextualización hidrogeológica .....	11
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	12
4.1 SGD localizadas en la escena 1.....	12
4.2 SGD localizadas en la escena 2.....	17
5. CONCLUSIONES .....	20
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	21

## Índice de figuras y tablas

Figura 1. Interrelación del agua del mar y el agua subterránea del continente (GREENPEACE España, 2015) .....	1
Figura 2. Área de estudio, representadas por las escenas 1 y 2 .....	3
Figura 3. Mapa hidrogeológico de Catalunya y norte de Castellón (IGME, 2000) .....	4
Figura 4. Esquema del procedimiento aplicado.....	6
Figura 5. Procesamiento para la temperatura de brillo en Celsius, en el entorno de Qgis. ....	7
Figura 6. Esquema del procedimiento aplicado para el cálculo medidas estadísticas. ....	10
Figura 7. Esquema del proceso aplicado para la contextualización hidrogeológica de las zonas de SGD.....	11
Figura 8. SGD localizadas en la costa de las provincias de Castellón y Tarragona.....	12
Figura 9. SGD localizadas en las costa de las provincias de Barcelona y Gerona.....	17
Tabla 1. Imágenes adquiridas para el caso de estudio. ....	5
Tabla 2. Datos secundarios y software utilizado.....	6
Tabla 3. Imágenes ordenadas según temperatura mínima. ....	8
Tabla 4. Criterios para la selección de imágenes. ....	9
Tabla 5. SGD localizada en Alcocebre .....	12
Tabla 6. SGD localizada en Torre Badum y Peñíscola.....	13
Tabla 7. SGD localizada en Vinaroz y Montsia Mar .....	15
Tabla 8. SGD localizada en Delta del Ebro.....	16
Tabla 9. SGD localizado en Garraf .....	17
Tabla 10. SGD localizado en Llored de Mar y La Selva de Mar. ....	18
Tabla 11. SGD localizado en Port de la Selva. ....	19

# 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descarga de aguas subterráneas al mar

La descarga de agua subterránea al mar (SGD por sus siglas en inglés), se define ampliamente como cualquier flujo de agua a través del lecho marino de tierra a mar (Burnett et al. 2003) y abarca varios componentes del flujo subsuperficial (figura 1), incluyendo agua dulce terrestre y agua de mar recirculada (Moore, 1999). El agua subterránea se filtra persistentemente en el mar a través de sedimentos permeables en cualquier lugar donde un acuífero está conectado hidráulicamente a un cuerpo de agua superficial (Johannes, 1980). La SGD es extremadamente variable tanto espacial como temporalmente pero ocurre predominantemente en forma de filtraciones cercanas a la costa. A nivel de ejemplo en zonas kársticas la filtración submarina se produce generalmente en redes extensas de cuevas y canales subterráneos que incluyen sistemas locales de fracturas (Shaban et al. 2005) que facilitan el transporte de aguas subterráneas desde acuíferos terrestres a varios kilómetros hacia la costa.

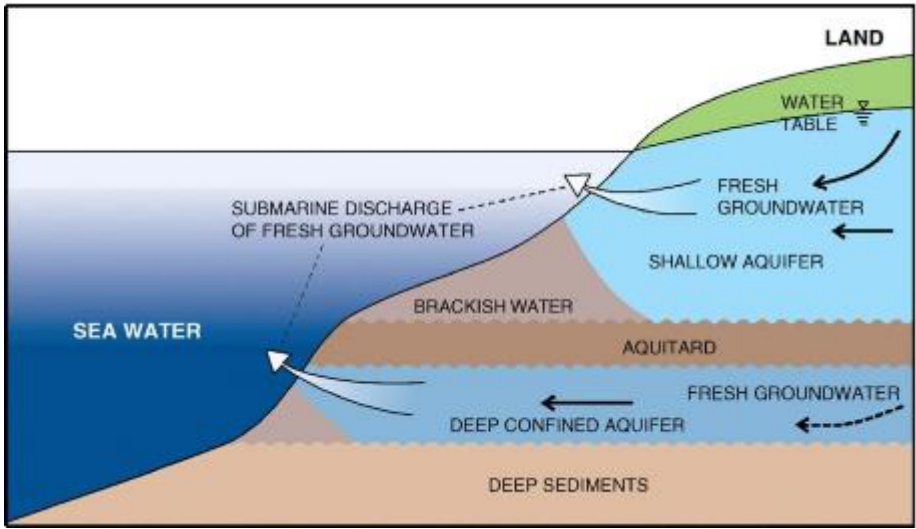


Figura 1. Interrelación del agua del mar y el agua subterránea del continente (GREENPEACE España, 2015)

El agua subterránea en tránsito de tierra a mar puede contaminarse con una variedad de sustancias que incluyen nutrientes y metales pesados (Lee et al. 2009), por lo tanto la SGD se ha definido en la literatura como una fuente y camino potencialmente significativos de nutrientes a hacia los acuíferos costeros. Si bien se considera que la descarga de agua subterránea fresca es menos del 10% del flujo total de agua dulce al océano, los aportes de nutrientes y contaminantes asociados pueden ser mucho más significativos porque las concentraciones en el agua subterránea a menudo exceden la de las aguas superficiales (Slomp et al. 2004). Por lo tanto las tasas de descarga de agua subterránea relativamente pequeñas pueden entregar cantidades relativamente grandes de solutos incluidos nutrientes a las áreas costeras. Por ejemplo el suministro de nutrientes a través de la SGD se ha relacionado con la eutrofización y se ha sugerido como un posible precursor de la proliferación de algas nocivas (Hu et al. 2006) o aumento de las concentraciones bacterianas (Boehm et al. 2004). Para el caso particular del mar Mediterráneo occidental esta se caracteriza por afloramiento de rocas de carbonato mesozoico (IGME 1986). En esta área las tasas de flujo de SGD se han cuantificado en varios lugares en años recientes (García-Solsona, et al., 2010). Un ejemplo claro de esto son las SGD localizadas y cuantificadas en el acuífero kárstico costero del Maestrazgo el cual se extiende ampliamente hacia el interior en el norte de la provincia de Castellón (Mejías, et al., 2008).

## 1.2 Imágenes Térmicas

Las imágenes térmicas ofrecen posibilidades únicas para detectar el flujo de agua subterránea en cuerpos de agua como ríos y lagos o mares costeros conocidos como descarga de agua subterránea submarina (Becker, 2006). Por ejemplo en el Maestrazgo (España) las imágenes Térmicas han permitido obtener unos resultados de gran utilidad para la detección de anomalías térmicas relacionadas con surgencias de agua subterránea al mar, procedentes de un acuífero carbonatado (Mejías, et al., 2012).

Por lo expuesto. Para este trabajo se considera que la descarga de agua subterránea relativamente fría a aguas costeras más cálidas se manifiesta en la banda térmica 10 (B10) del satélite Landsat 8 en forma de contraste térmico, generando plumas de características variadas, según sea el caso de la zona de estudio.

## 1.3 Planteamiento del problema y objetivos

A pesar del reconocimiento de su impacto potencial en el funcionamiento del ecosistema costero la SGD sigue siendo un proceso poco comprendido y a menudo pasado por alto al implementar programas de monitoreo y manejo costero. Por ejemplo las directivas de la UE como la Directiva marco del agua (2000/60/ CE) destinadas a mejorar la calidad del medio ambiente acuático no reconocen a la SGD como una fuente potencial de nutrientes para su evaluación o monitoreo. Esto se debe a que la naturaleza espacial y temporalmente heterogénea de la descarga de agua subterránea es una fuente esencialmente invisible, esto hace que la localización y cuantificación de las tasas de SGD sea un desafío apreciable.

En reconocimiento de la importancia de la descarga de agua subterránea como una fuente potencial de contaminación, y los desafíos para ubicar y cuantificar la contribución de la descarga de agua subterránea a la zona costera. Se presenta una metodología integral y completamente gratuita, basada en la utilización de las imágenes térmicas (B10) del satélite Landsat 8 y las medidas estadísticas de rango y desviación estándar. Eso con la finalidad facilitar la evaluación regional de la SGD, para lo cual se consideró como caso de estudio la costa de Castellón y Catalunya en España.

Los objetivos de este estudio son: a) Valorar el potencial de la imagen térmica para localizar zonas de SGD en diferentes contextos hidrogeológicos del Mediterráneo, b) Medir y analizar la dispersión de datos en las SGD localizadas y c) Contextualizar hidrogeológicamente las SGD localizadas.



## 2. ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Contexto geográfico y geológico

El área de estudio se localiza en las costas de Castellón y Cataluña, que comprende las escenas 1 y 2 de la Figura 2. Ambas costas tienen una diversidad geográfica relativamente muy marcada. Su geografía está condicionada por el litoral mediterráneo al Este con 580 kilómetros de costa, al Norte por las grandes unidades de relieve de los Pirineos, al Oeste por las comunidades autónomas de Aragón y al Sur por la comunidad Valenciana. (Dogc, 1998).

El estado geológico actual de Castellón y Catalunya puede comenzar a describirse desde los primeros grandes cambios del Paleozoico. En un inicio el territorio formaba parte de una cuenca oceánica en la que se depositaban materiales arcillosos. Los materiales sedimentados de la época se transformaron en gneis, esquisto y pizarra que aflora hoy día en la mitad norte de las cordilleras litorales y el Pirineo axial.

En la era mesozoica se generó gran cantidad de material calcáreo. Hoy en día este material se encuentra en la mitad sur de las cordilleras litorales y en el Prepirineo. En la era cenozoica las placas tectónicas euroasiática y africana toman contacto, que dará lugar a los Pirineos. Al final del periodo se inicia el surgimiento de volcanes en la zona de Olot que perduraron hasta el cuaternario y los glaciares del Pirineo acaban por conformar el territorio (ACA, 2005).

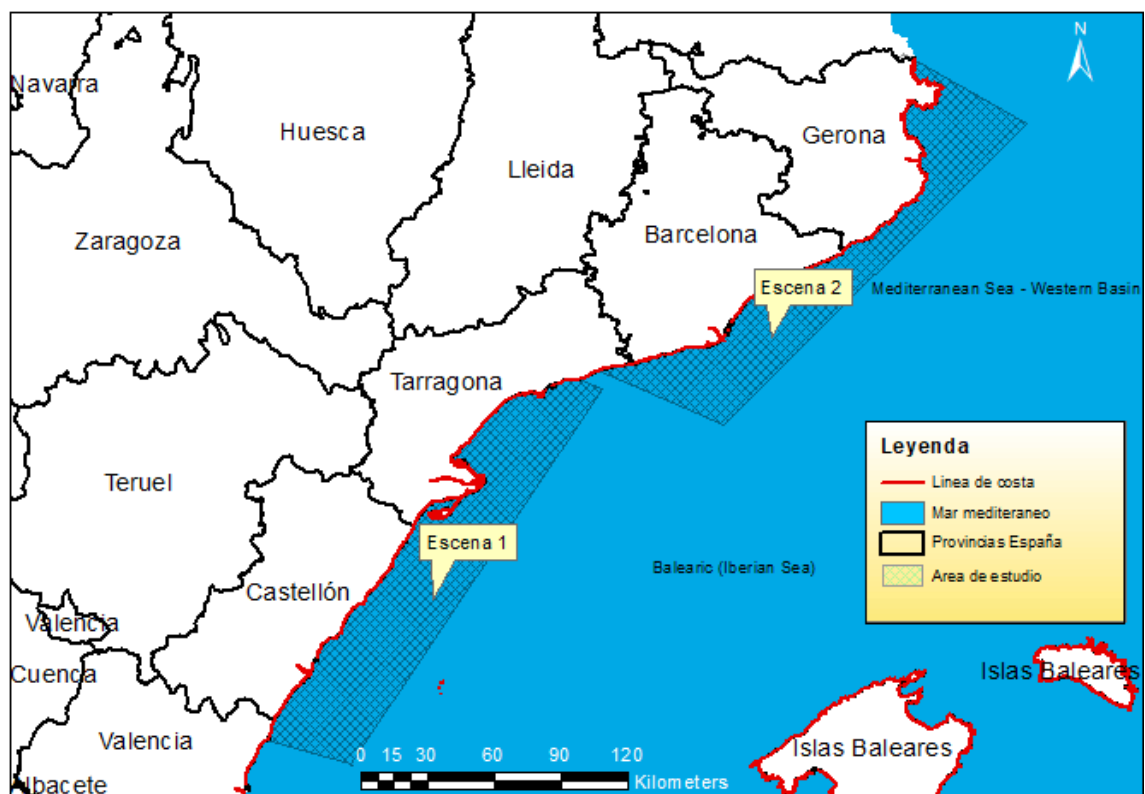


Figura 2. Área de estudio, representadas por las escenas 1 y 2

Las costa de Castellón y Catalunya goza de un clima mediterráneo. Con un clima suave, templado en invierno y muy caluroso en verano, con precipitaciones anuales por encima de los 700 mm. Las temperaturas medias anuales oscilan desde los de 0 °C en los Pirineos hasta los 17 ° C en la costa sur. En invierno hay una diferencia notable de temperaturas entre el litoral costero (10° C)

y el interior (3 a 7° C). Las temperaturas en verano son más homogéneas alrededor de los 25° C (GenCat, 2017).

## 2.2 Hidrogeología

Las aguas subterráneas constituyen un 35 % de los recursos hídricos utilizados, que se estiman superiores a los 900 hm<sup>3</sup>/año (ACA, 2005). En Catalunya se han identificado 49 áreas hidrogeológicas, 23 ubicadas en las cuencas internas de Catalunya y 26 en las cuencas Catalanas del Ebro. La figura 3 muestra las áreas hidrogeológicas de interés para el caso de estudio.

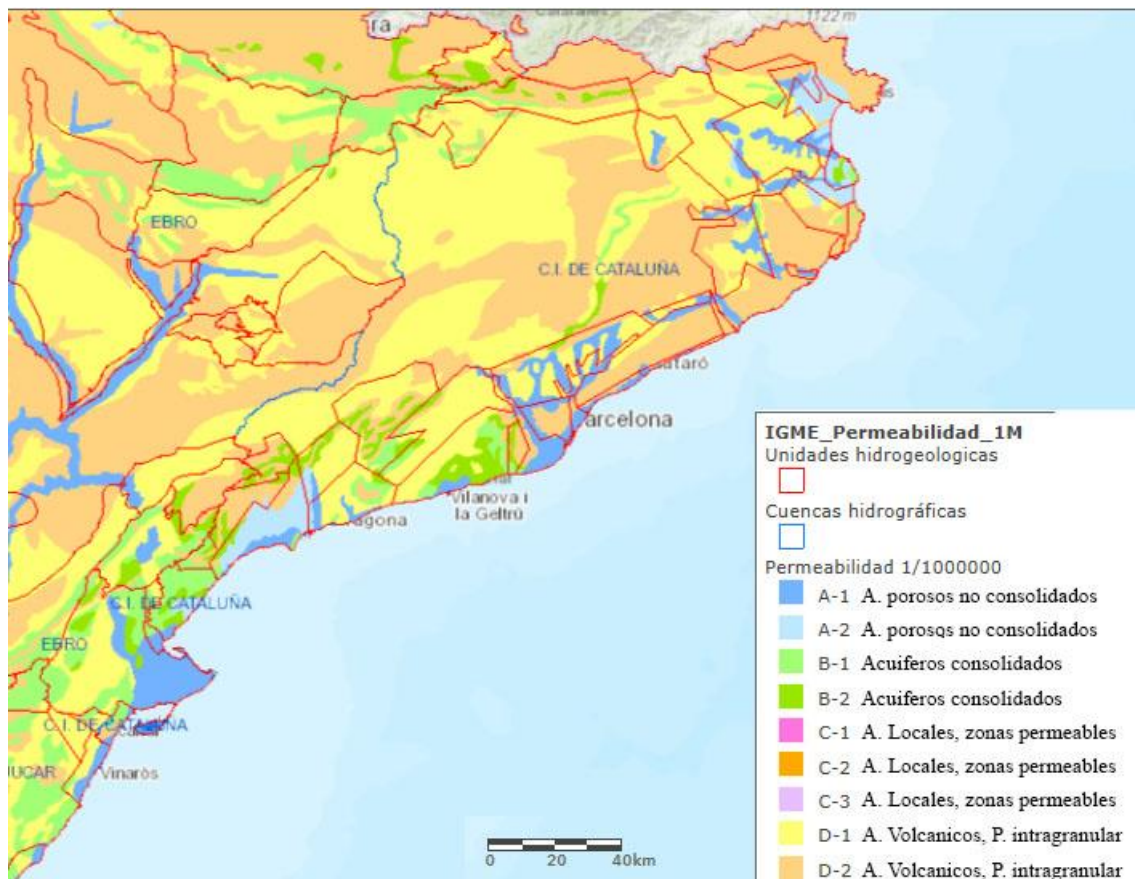


Figura 3. Mapa hidrogeológico de Catalunya y norte de Castellón (IGME, 2000)

La figura 3, constituye una síntesis de las macro unidades hidrogeológicas en la se divide las zonas adyacentes al área de estudio, cuyas características se detallan a continuación.

- Formaciones tipo A-1: Acuíferos generalmente extensos muy permeables y productivos; predominio de acuíferos porosos en medios aluviales y coluviales con porosidad intergranular. Los de tipo A-2: Son acuíferos extensos, discontinuos y locales de permeabilidad y producción moderada, no excluye la existencia en profundidad de otros acuíferos cautivos y más productivos; predominio de acuíferos porosos en medios detríticos granulares (rellenos neógenos y cuaternarios) con porosidad intergranular.
- Formaciones tipo B-1: Acuíferos muy permeables, generalmente extensos y productivos; predominio de acuíferos consolidados detríticos con porosidad por fisuración y/o intergranular. Los tipo B-2: Son acuíferos extensos, discontinuos y locales, de permeabilidad y producción moderada; predominio de acuíferos consolidados carbonatados con porosidad por fisuración y/o carstificación.
- Formaciones tipo C-1, C-2 Y C-3: Son acuíferos poco permeables y locales; predominio de depósitos detríticos, graníticos y metamórficos respectivamente.

- Las formaciones tipo D1 y D2: Son acuíferos volcánicos, con permeabilidad intergranular y porosidad por fisuración respectivamente.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Materiales

##### 3.1.1 Datos

Las Imágenes de sensores remotos son la fuente más popular de datos utilizados en aplicaciones SIG y Teledetección (Yeung, 2002). En consecuencia las imágenes del satélite Landsat 8 son una de las fuentes primarias más importante de datos utilizados en esta investigación. Cabe indicar que este estudio se centra en el uso de la imagen térmica (banda 10) del satélite Landsat 8 con una resolución de 30 m.

Las imágenes se obtuvieron del servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos "USGS" (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Para este caso de estudio se adquirió un total de 14 imágenes térmicas (B10) para cada escena, los cuales fueron seleccionadas considerando la nula presencia de nubes en el área de estudio. Los datos de las imágenes en mención se detallan en la tabla 1.

Escena 1				Escena 2			
ID	Fecha de imagen	Fila	Ruta	ID	Fecha de imagen	Fila	Ruta
1	09/03/2014	198	32	1	02/03/2014	197	31
2	10/04/2014	198	32	2	05/05/2014	197	31
3	08/02/2015	198	32	3	10/09/2014	197	31
4	28/03/2015	198	32	4	31/12/2014	197	31
5	20/09/2015	198	32	5	05/03/2015	197	31
6	01/05/2016	198	32	6	25/06/2015	197	31
7	06/09/2016	198	32	7	04/02/2016	197	31
8	01/03/2017	198	32	8	20/02/2016	197	31
9	17/03/2017	198	32	9	14/08/2016	197	31
10	21/06/2017	198	32	10	22/02/2017	197	31
11	27/10/2017	198	32	11	17/03/2017	197	31
12	12/11/2017	198	32	12	17/08/2017	197	31
13	28/11/2017	198	32	13	24/01/2018	197	31
14	26/07/2018	198	32	14	23/10/2018	197	31

Tabla 1. Imágenes adquiridas para el caso de estudio.

##### 3.1.2. Datos secundarios y software

En la tabla 2 se presentan los datos secundarios y el software utilizado para este caso de estudio. Los datos se obtuvieron de diferentes servidores; como el Centro Nacional de Información Geográfica (CNING), Sistema integrado de la Información del Agua (SIA) y el Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya (ICGC).

Tipo	Descripción
Imagen	Imagen satelital en ArcGIS online
Infraestructura de datos espaciales	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ SHP de provincias españolas, mar mediterráneo, línea de costa, escena 1 y escena 2.</li> <li>➤ Capa layer de unidades hidrogeológicas.</li> </ul>
Software	Qgis, ArcGIS, Word y Excel

Tabla 2. Datos secundarios y software utilizado.

La imagen satelital en ArcGIS online, se utiliza con la finalidad tener una idea más clara de las zonas de SGD localizadas, además que es necesario para la presentación final en el apartado de resultados. El formato SHP de ESRI (Environmental Systems Research Institute) es necesario para generar los mapas de ubicación, delimitar el área de estudio representadas por las escenas 1 y 2, entre otros.

La capa layer de unidades hidrogeológicas, se utiliza para visualizar datos de unidades de masas de agua de la parte terrestre adyacente al área de estudio. El software fue requerido para para la redacción y los procesos respectivos detallados en el apartado de métodos, los cuales generaron los resultados del presente trabajo.

### 3.2 Métodos

El estudio se llevó a cabo en tres etapas

1. Cálculo de temperatura de brillo en Celsius
2. Cálculo de medidas estadísticas
3. Contextualización hidrogeológica

#### 3. 2.1 Cálculo de temperatura de brillo en Celsius

La figura 4, resumen el procedimiento seguido en este apartado.

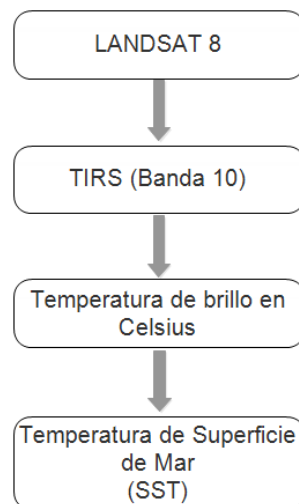


Figura 4. Esquema del procedimiento aplicado.

Como se indica en la figura 4, se inicia con la adquisición de imágenes del satélite Landsat 8 (Tabla 1). Para después centrarse en las banda térmica 10 al cual se le aplica el procesamiento respectivo para la temperatura de brillo en Celsius, para tal fin se utilizó el plugin de Clasificación Semi Automática de Qgis. Cabe indicar que para facilitar el proceso se suprimió de la carpeta inicial (paquete de descarga) las imágenes que no son requeridas para este caso de estudio, para

posteriormente proseguir con el procedimiento adaptado del manual “Semi-Automatic Classification Plugin Documentation” (Congedo, 2019). El procedimiento se inició en la pestaña de preprocesamiento para así poder localizar la carpeta que contiene la imagen térmica y los archivos que almacenan los datos de la misma; como paso siguiente se seleccionó la casilla temperatura de brillo en Celsius dado que es la que corresponde para este tipo de procesamiento; posterior a ello se corrió el plugin. Lo expuesto anteriormente se resume en la figura 5.

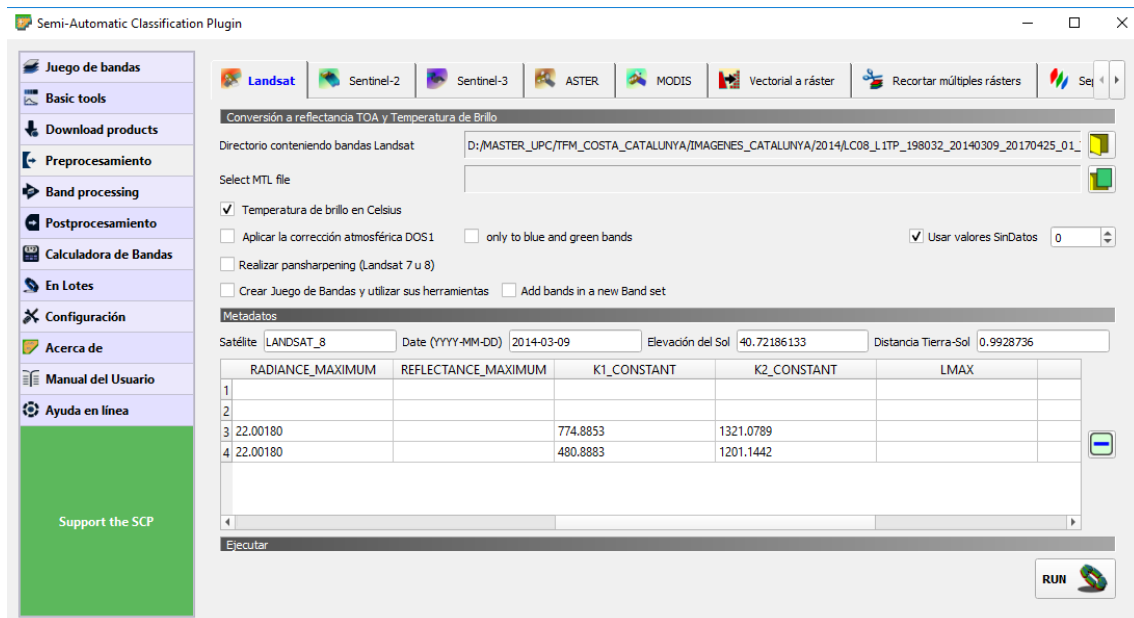


Figura 5. Procesamiento para la temperatura de brillo en Celsius, en el entorno de Qgis.

La figura 5, muestra el plugin de clasificación semi automática de Qgis. Enfocado en el preprocesamiento, en el cual se observa los datos más resaltantes respecto a la imagen, tales como fecha de adquisición, elevación de sol, distancia tierra-sol, constantes K1 y K2, estas últimas son los elementos principales para determinar la temperatura de brillo en grados Celsius.

La ecuación que determina la temperatura de brillo es como sigue (Chander & Markham, 2003; Landsat Project Science Office, 2003):

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{Ecuación 1}$$

**Dónde:**

T = Temperatura de brillo del satélite (°C)

$L_\lambda$  = radiancia espectral TOA (Watts / (m<sup>2</sup> \* srad \* μm)).

$K_1$  = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos

$K_2$  = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos

Para Landsat 8, los valores de  $K_1$  y  $K_2$  son proporcionadas en el archivo de metadatos de la imagen.  $K_1$  y  $K_2$  son calculadas como. (Jimenez-Munoz & Sobrino, 2010):

$$K_1 = \frac{C_1}{\lambda^5}; K_2 = \frac{C_2}{\lambda}$$

Donde (Mohr, Newell, & Taylor, 2015):

C1 = Primera constante de radiación =  $1.119 \cdot 10^{-16} \text{Wm}^2\text{sr}^{-1}$

C2= Segunda constante de radiación =  $1,4388 \cdot 10^{-2} \text{mK}$

Como paso Final para esta etapa, con una máscara de capa en Qgis se suprimió la parte terrestre de las imágenes resultantes del procedimiento correspondiente a la temperatura de brillo en Celsius. Eso con la finalidad de obtener las imágenes para las escenas 1 y 2 (Figura 2), correspondientes a la temperatura superficial de mar (SST). Las imágenes finales obtenidas tras esta primera etapa se presentan en la tabla 3, las cuales fueron ordenadas según temperatura mínima para cada escena, con la finalidad de evitar la posible influencia de pixeles de la superficie terrestre. Ya que la delimitación para la supresión de la misma no fue de gran precisión en toda la extensión. Cabe indicar que la lista ordenada de imágenes es requerida para la etapa 2 (cálculo de medidas estadísticas). Las imágenes en mención están basadas en la temperatura mínima aparente sin la corrección de la emisividad del agua, que corresponde a la radiación térmica emitida por su superficie debido a su temperatura.

Escena 1			Escena 2		
ID	Fecha	Temperatura Mínima °C	ID	Fecha	Temperatura Mínima °C
1	2015-02-08	2,9	1	2015-03-05	3,1
2	2017-11-12	5,7	2	2014-03-02	4,2
3	2017-11-28	8,5	3	2014-12-31	5,8
4	2014-03-09	9,8	4	2017-02-22	6,7
5	2016-05-01	9,8	5	2016-02-20	9,6
6	2017-03-01	10,4	6	2016-02-04	9,9
7	2015-03-28	12,1	7	2018-01-24	10,2
8	2017-03-17	12,2	8	2014-05-05	10,8
9	2014-04-10	13,0	9	2017-03-17	11,9
10	2017-10-27	18,6	10	2017-08-17	16,4
11	2015-09-20	19,7	11	2018-10-23	16,5
12	2017-06-21	20,2	12	2015-06-25	18,4
13	2018-07-26	21,5	13	2014-09-10	19,0
14	2016-09-06	21,7	14	2016-08-14	19,2

Tabla 3. Imágenes ordenadas según temperatura mínima.

### 3.2.2 Calculo de medidas estadísticas

El cálculo de las medidas estadísticas (Mallast, et al., 2014) se aplicó con la finalidad de localizar las potenciales SGD en el área de estudio. Dicho calculo consistió en calcular el rango y la desviación estándar de un conjunto ordenado de imágenes presentados en la tabla 3. Previo a ello se hace necesario ubicar el máximo, el mínimo y calcular la media de las imágenes en mención. Dado que estos resultados son requeridos para calcular el rango y la desviación estándar, el cual se hizo en diferentes niveles(pre-filtro) para cada escena. En base a que con las 14 imágenes iniciales no se logró localizar la totalidad de las zonas de SGD del presente estudio, sobre todo los de tipo difuso, por lo que se hizo necesario seleccionar imágenes a niveles más bajos (9 y 5 imágenes) considerando los criterios de la tabla 4. Cabe indicar que la media, el rango y la desviación estándar se calcularon con la calculadora ráster de ArcGIS, así también se aclara que solo el rango y a desviación estándar son los usados para la localización de SGD. Eso tomando en cuenta los resultados del autor de las medidas estadísticas (Mallast, et al., 2014).

Escenas	Imágenes	ID (tabla 1)	Criterio
1	14	1-14	≈ 0% nubosidad
	9	3, 5,6, 8, (10-14)	Visualización de datos (plumas de SGD y ríos)
	5	10-14	Zonas con indicios de SGD
2	14	1-14	≈ 0% nubosidad
	9	1-9	Visualización de datos (plumas de SGD y ríos)
	5	2, 4,5, 7,11	Zonas con indicios de SGD

Tabla 4. Criterios para la selección de imágenes.

Las primeras 14 imágenes para las escenas 1 y 2, indicadas en la tabla 4, se seleccionaron considerando la nula presencia de nubes (a nivel visual) en el área de estudio. Para la selección de las 9 imágenes siguientes, se consideró muestras representativas, los cuales se seleccionaron considerando que las imágenes siempre mostraban datos (pluma de río o surgencia), esto en base a que las 14 imágenes iniciales no siempre mostraban datos a pesar de que el nivel visual era muy bueno. Para las 5 últimas imágenes se tomó como criterio zonas focalizadas, las cuales no mostraban datos claros, pero que mostraban indicios de anomalía térmica (SGD), esta última selección se hizo con la finalidad de contrastar (SGD aparente) y localizar nuevas zonas de SGD.

Las medidas estadística aplicadas son una adaptación del libro de estadista aplicada (Crespo, 2013) las cuales se detallan a continuación.

Media: Es la suma de las imágenes observadas dividido en por el número de imágenes.

Si el número de imágenes es n, entonces la media es.

$$X = \frac{\sum X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_n}{n} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

X: Media de las imágenes.

Xi: Imágenes observadas.

n: número de imágenes.

Mínimo: Si n es el número imágenes, entonces el minino es la primera imagen de la lista ordenada.

$$n = (X_1, \dots, X_n)$$

$$\min = X_1 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

n: número de imágenes.

Min: mínimo

Máximo: Si n es el número imágenes, entonces el máximo es la última imagen de la lista ordenada.

$$n = (X_1, \dots, X_n)$$

$$\text{Max} = X_n$$

Ecuación 4

Donde:

n: número de imágenes

Max: máximo

Rango: Si n es el número de imágenes, entonces el rango es la diferencia entre sus valores máximos y mínimos en un conjunto de datos ordenados.

$$n = (X_1, \dots, X_n)$$

$$R = X_n - X_1$$

Ecuación 5

Donde:

R: rango

$X_n$ : valor máximo

$X_1$ : valor mínimo

Desviación estándar: Si n es el número de imágenes, entonces la desviación estándar equivale a la medida de la dispersión de una distribución de frecuencias respecto a su media, lo que equivalente a la raíz cuadrada de la varianza.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1}}$$

Ecuación 6

Donde:

$S_x$  = desviación estándar de la imágenes

$X_i$  = Imágenes observadas.

$X$  = media de las imágenes.

n = Número de imágenes.

El procedimiento explicado para esta etapa de cálculo de medidas estadísticas se resume en la figura 6.

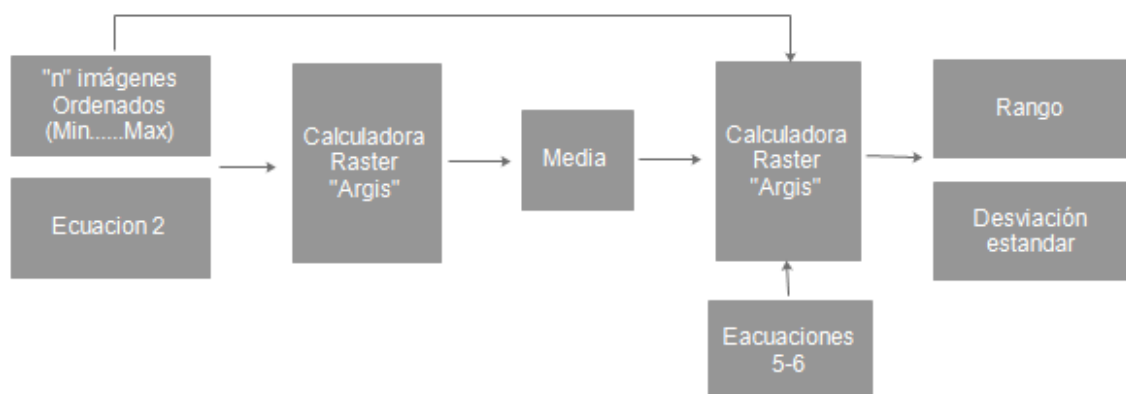


Figura 6. Esquema del procedimiento aplicado para el cálculo medidas estadísticas.



Cabe indicar que tras los resultados de las medidas estadísticas se procedió a localizar las SGD a nivel de rango y desviación estándar, las mismas zonas que fueron medidas con la herramienta IDENTIFY de ArcGIS. El procedimiento consistió en medir las SGD localizadas del centro hacia los extremos, para así evaluar la dispersión de datos en la SGD.

### 3.2.3 Contextualización hidrogeológica

La finalidad de esta etapa es contextualizar desde un punto vista hidrogeológico las SGD localizadas, para entender la relación entre el acuífero y la SGD. Para ello, se recurrió a los datos de la capa layer de unidades hidrogeológicas de la Agencia Catalana del Agua (ACA), y a las fichas de los acuíferos correspondientes a Cataluña obtenidas a partir de la misma fuente. Cabe indicar que para las SGD localizadas fuera de Cataluña se recurrió a estudios previos referentes a la temática (artículos). El proceso básicamente consistió en la importación de los puntos SGD localizados a la capa layer de unidades hidrogeológicas de Catalunya y así generar una superposición de capas. El proceso en mención se llevó a cabo mediante la plataforma de ArcGIS. Posterior a ello se procedió a identificar las unidades hidrogeológicas correspondientes a las zonas de SGD localizadas y así contextualizarlas basándose en las fichas hidrogeológicas del ACA. El procedimiento seguido se resume en la figura 7.

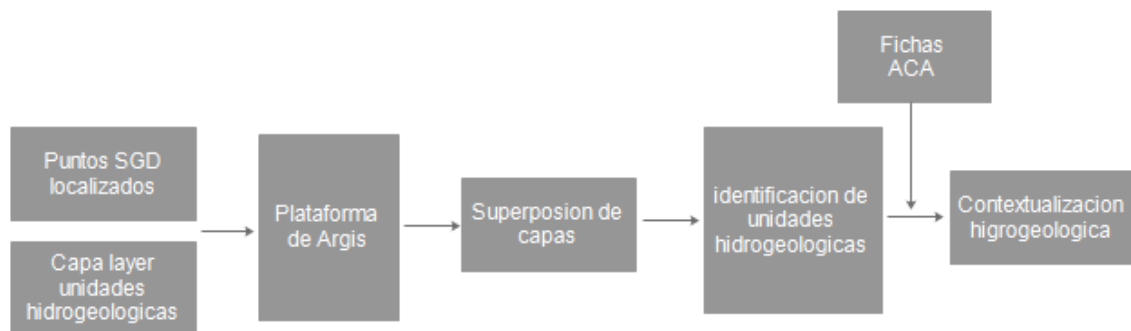


Figura 7. Esquema del proceso aplicado para la contextualización hidrogeológica de las zonas de SGD.

## 4. RESULTADOS Y DISCUCIONES

### 4.1 SGD localizadas en la escena 1

Las SGD localizadas en la escena1 se presentan en la figura 8, las cuales corresponden a las provincias de Castellón y Tarragona.

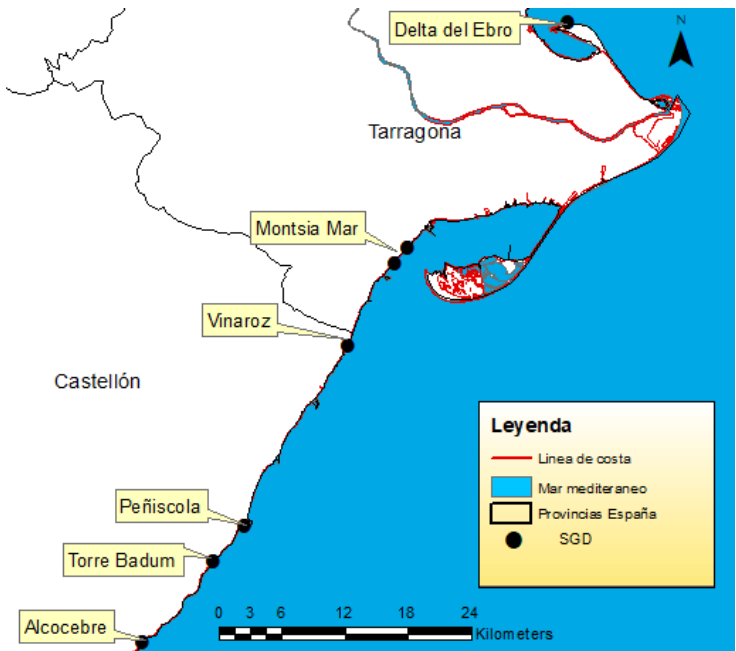


Figura 8. SGD localizadas en la costa de las provincias de Castellón y Tarragona.

Los detalles de las SGD localizadas se presentan en las tablas 5, 6, 7 y 8.

Escena 1		Datos
		<b>Alcocebre</b>
		Coordenadas UTM: 269459.30 m E, 4459226.78 m N
		Unidad Hidrogeológica: Maestrazgo Oriental
		Provincia: Castellón
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 9 imágenes. Correspondientes a diferentes épocas del año. [ID: 3, 5, 6, 8, (10-14). Tabla 1]

Tabla 5. SGD localizada en Alcocebre

La tabla 5, presenta la SGD localizada en Alcocebre, cuyas medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 10.5 a 10.6°C y de 4.6 a 4.7°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores bajos correspondientes a una dispersión de datos de 0.1°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante, que varía de forma insignificante respecto a la temperatura ambiente. Además aparentemente también refleja las

ubicaciones con volúmenes de descarga concentrados pero menores. A nivel de rango no se visualiza una pluma característica de SGD, dado que la dispersión de datos para ese punto está por debajo del rango visible (0.2- 3.8°C). Para el caso de la desviación estándar se puede visualizar una pluma de SGD difusa de 4.5 hectáreas aproximadamente. Respecto a la temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 19 a 20°C, el cual es similar a los valores obtenidos por (Antón-Pacheco, et al., 2007) que oscila de 18 a 20°C. El caudal de descarga varía según la temporada en el rango de  $(3-15) \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  (Mejías, et al., 2012). La localización en mención comprende a un acuífero kárstico costero que se extiende ampliamente hacia el interior en el norte de la provincia de Castellón (Mejías, et al., 2008).

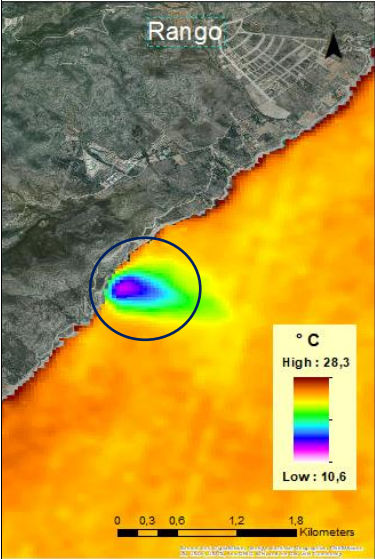
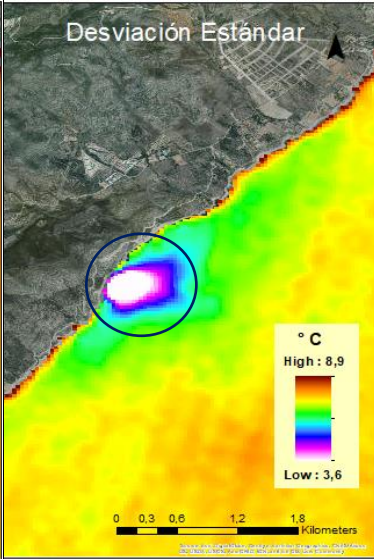
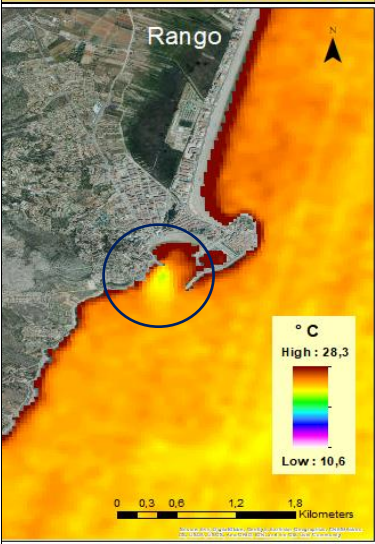
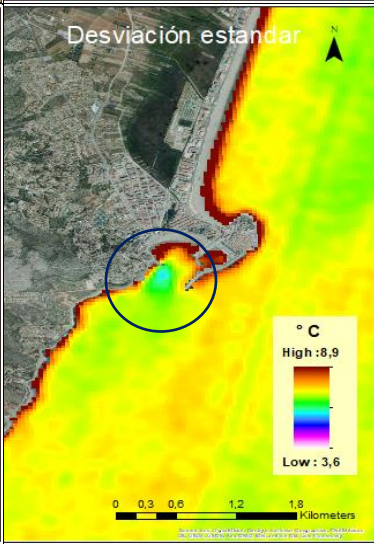
Escena 1		Datos
		Torre Badum
		Coordenadas UTM: 276269.12 m E, 4466961.97 m N Unidad Hidrogeológica: Maestrazgo Oriental Provincia: Castellón Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 14 imágenes. Correspondientes a diferentes épocas del año. (ID: 1-14. Tabla 1).
		Peñíscola
		Coordenadas UTM: 279200.71 m E, 4470350.74 m N Unidad Hidrogeológica: Maestrazgo Oriental Provincia: Castellón Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 14 imágenes. Correspondientes a diferentes épocas del año. (ID: 1-14. Tabla 1).

Tabla 6. SGD localizada en Torre Badum y Peñíscola

La tabla 6, presenta la SGD localizada en Torre Badum, cuyas medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 12 a 15.8°C y de 3.6 a 4.7°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores altos correspondientes a una dispersión de datos de 3.8 y 1.1°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma significativa respecto a la temperatura ambiente. Además aparentemente también refleja las ubicaciones con volúmenes de descarga concentrados y mayores. A nivel de rango y desviación estándar se logra visualizar plumas de SGD definidas de 44 y 27 hectáreas aproximadamente.

Respecto a temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 23 a 24°C, el cual es similar a los valores obtenidos por (Antón-Pacheco, et al., 2007) que oscila de 18 a 24°C. El caudal de descarga varía según la temporada en el rango de  $(72-190) \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  (García-Solsona, et al., 2010). La localización en mención comprende a un acuífero kárstico costero que se extiende ampliamente hacia el interior en el norte de la provincia de Castellón (Mejías, et al., 2008). El acuífero en mención corresponde a un gradiente hidráulico de 1 a 2%, el cual permite el flujo de agua a gran velocidad, esto se ve reflejado en la SGD que genera una pluma definida y de gran extensión.

Para de la SGD localizada en Peñíscola (tabla 6), las medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 15.6 a 15.9°C y de 4.8 a 5°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores correspondientes a una dispersión de datos de 0.3°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma moderada respecto a la temperatura ambiente. A nivel de rango y desviación estándar se logra visualizar plumas de SGD ligeramente definidas de 1.7 y 10.9 hectáreas respectivamente. Respecto a temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 18 a 20°C, el cual difiere de los valores obtenidos por (Antón-Pacheco, et al., 2007) que oscilan de 23 a 24°C; esta diferencia posiblemente sea por el número imágenes utilizados en el presente estudio, el cual corresponde a diferentes épocas del año. El caudal de descarga varía según la temporada en el rango de  $(34-83) \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  (Rodellas, et al., 2012). La localización en mención comprende a un acuífero kárstico costero que se extiende ampliamente hacia el interior en el norte de la provincia de Castellón (Mejías, et al., 2008).



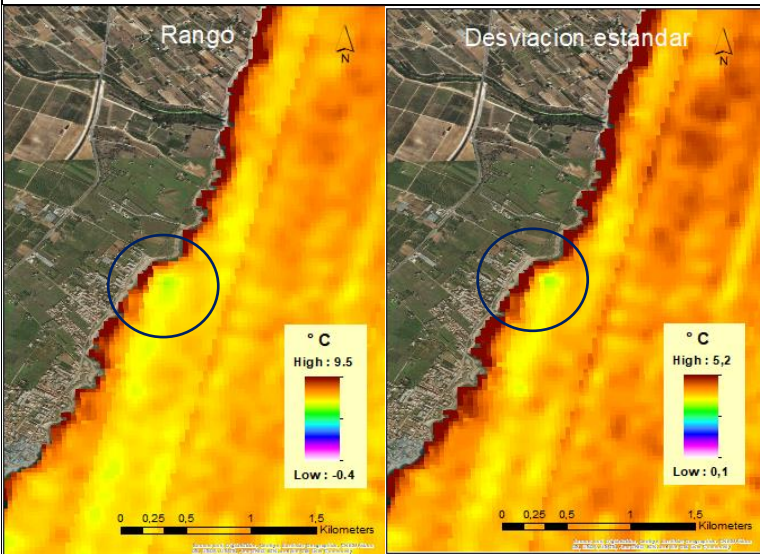
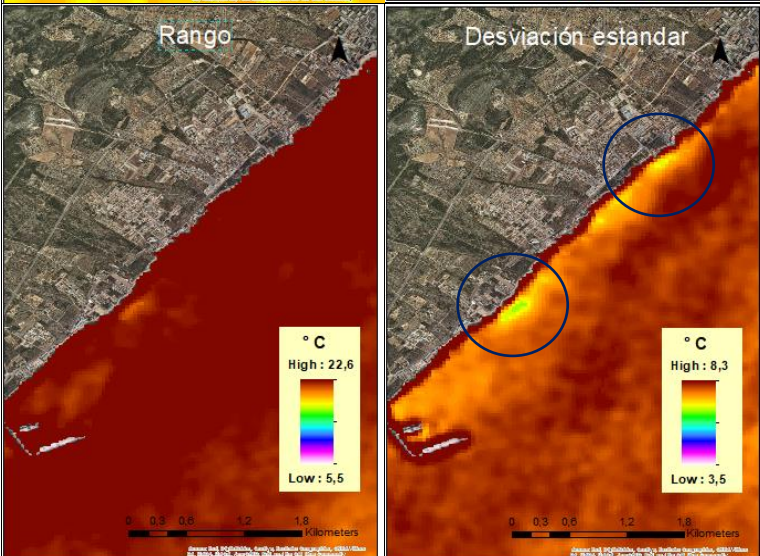
Escena 1		Datos
		<b>Vinaroz</b>
		Coordenadas UTM: 289082.01 m E, 4487522.60 m N
		Unidad Hidrogeológica: Plana de Vinaroz
		Provincia: Castellón
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 5 imágenes. Correspondientes a la estación de verano. (ID: 10-14. Tabla 1).
		<b>Montsia Mar</b>
		Coordenadas UTM: (293596.87 m E, 4495415.09 m N) ; (294782.58 m E, 4496850.98 m N)
		Unidad Hidrogeológica: Mesozoic dels Ports i Montsia
		Provincia: Tarragona
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 9 imágenes. Correspondientes a diferentes épocas del año. [ID: 3, 5, 6, 8, (10-14). Tabla 1].

Tabla 7. SGD localizada en Vinaroz y Montsia Mar

La tabla 7, presenta la SGD localizada en Vinaroz, cuyas medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 3.2 a 3.4°C y de 1.7 a 1.9°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores bajos correspondientes a una dispersión de datos de 0.2°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma insignificante respecto a la temperatura ambiente. Además aparentemente también refleja las ubicaciones con volúmenes de descarga moderados. A nivel de rango y desviación estándar se puede visualizar una pluma de SGD difusa de aproximadamente 1.3 hectáreas. Respecto a temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 23 a 24°C. Cabe indicar que no se cuenta con datos de estudios previos para la localización de la SGD. La localización en mencion corresponde a un acuífero generalmente extenso, muy permeables y productivos tipo A-1; predominio de acuíferos porosos en medios aluviales y coluviales con porosidad intergranular (ACA, 2005).

Para la SGD localizada en Montsia Mar (tabla 7), las medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 11.6 a 11.8°C y de 4.8 a 5°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores bajos correspondientes a una dispersión de datos de 0.2°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma insignificante respecto a la temperatura ambiente. A nivel de rango no se puede visualizar una pluma característica de

SGD, esto posiblemente por la dispersión de datos el cual está representado por un valor mínimo visible (0.2°C). Para el caso de la desviación estándar se puede visualizar dos plumas de SGD difusas de 1 y 3 hectáreas aproximadamente. Respecto a temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 19 a 20°C. En estudios previos (Llebot, et al., 2014) obtuvieron valores que oscilan de 20 a 22°C, esta diferencia no muy marcada sea posiblemente por el sed de imágenes utilizadas en este trabajo, el cual corresponde a diferentes épocas del año. El caudal de descarga varía según la temporada en el rango de  $(40-310) \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  (Garcia-Solsona, et al., 2010). La localización en mención corresponde a un acuífero extenso, discontinuo y local de permeabilidad y producción moderada, no excluye la existencia en profundidad de otros acuíferos (ACA, 2005).

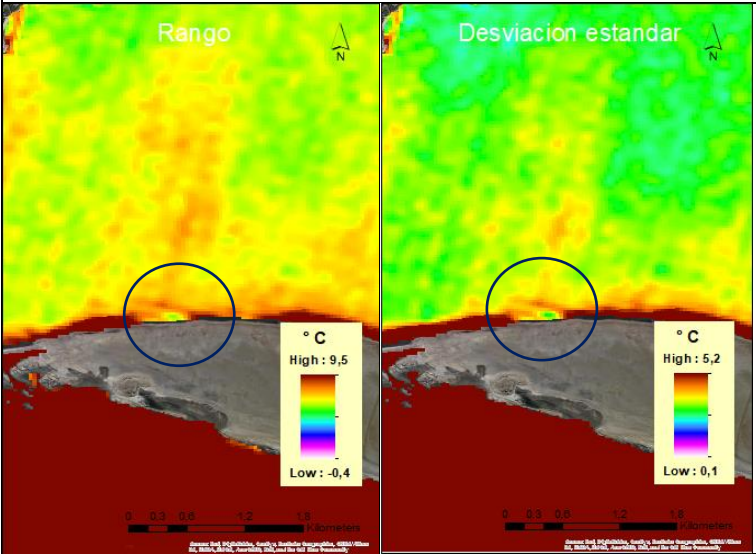
Escena 1		Datos
		Delta del Ebro
		Coordenadas UTM: 309987.70 m E, 4518374.82 m N
		Unidad Hidrogeológica: Delta del Ebro
		Provincia: Terragona
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 5 imágenes. Correspondientes a la estación de verano. (ID: 10-14. Tabla 1)

Tabla 8. SGD localizada en Delta del Ebro

La tabla 8, presenta la SGD localizada en Delta del Ebro, cuyas medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 3.1 a 3.4°C y de 1.6 a 1.9°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores correspondientes a una dispersión de datos de 0.3°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma moderada respecto a la temperatura ambiente. A nivel de rango y desviación estándar se logra visualizar plumas de SGD ligeramente definidas de 0.5 y 1.25 hectáreas respectivamente. Respecto a temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 23 a 24°C. Cabe indicar que no se cuenta con datos de estudios previos para la localización de la SGD. La localización en mención corresponde a un acuífero generalmente extenso muy permeable y productivo; predominio de acuíferos porosos en medios aluviales y coluviales con porosidad intergranular (ACA, 2005).

4.2 SGD localizadas en la escena 2

Las SGD localizadas en la escena 2 se presentan en la figura 9, las cuales corresponden a las provincias de Barcelona y Gerona.

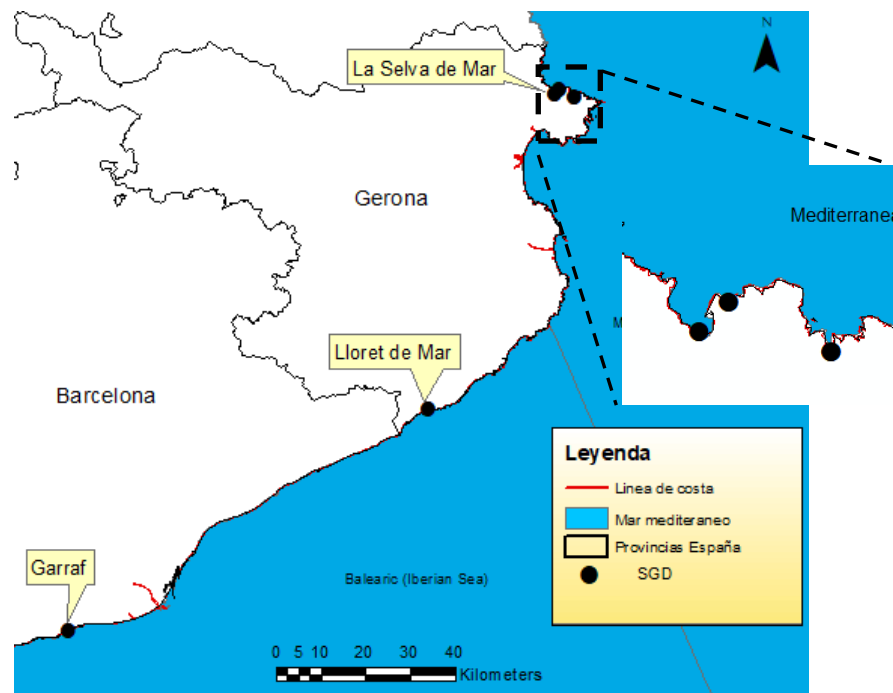


Figura 9. SGD localizadas en las costa de las provincias de Barcelona y Gerona.

Los detalles de las SGD localizadas se presentan en las tablas 9, 10 y 11.

Escena 2		Datos
		Garraf
		Coordenadas UTM: 407175.91 m E,4566896.06 m N
		Unidad Hidrogeológica: Garraf
		Provincia: Barcelona
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 14 imágenes. Correspondientes a diferentes épocas del año. (ID: 1-14. Tabla 1).

Tabla 9. SGD localizado en Garraf

La tabla 9, presenta la SGD localizada en Garraf, cuyas medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 10.5 a 10.7°C y de 4.6 a 4.7°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores correspondientes a una dispersión de datos de 0.2 y 0.1°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma insignificante respecto a la temperatura ambiente. A nivel de rango se puede visualizar una pluma difusa de aproximadamente 5 hectáreas. Para el caso de la desviación estándar se muestra una SGD



aparente, dado que la dispersión de datos en ese punto está en el valor más bajo del rango visible (0.1-1.1°C). Respecto a temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 16 a 17°C. Cabe indicar que para la ubicación de la SGD en mención solo se cuenta con dato de localización (Bakalowicz, 2018), pero no se tiene estudios previos respecto a temperatura, salinidad u otro aspecto. La ubicación en mención comprende a un acuífero Kárstico (ACA, 2005).

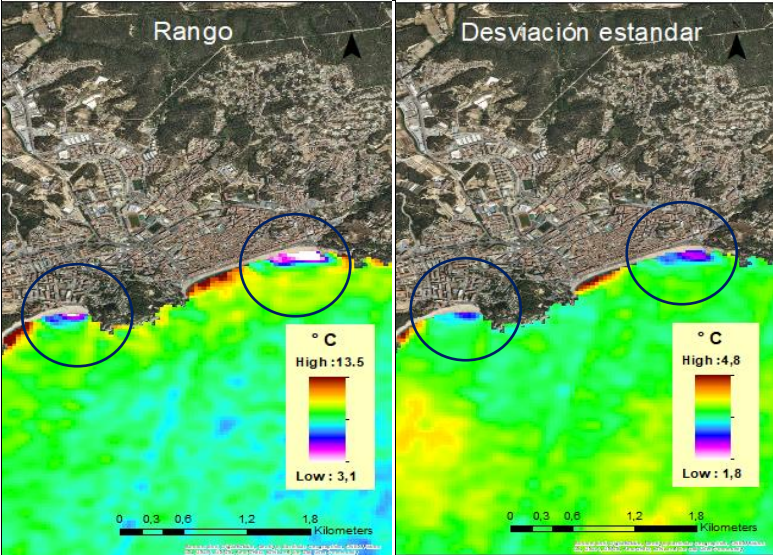
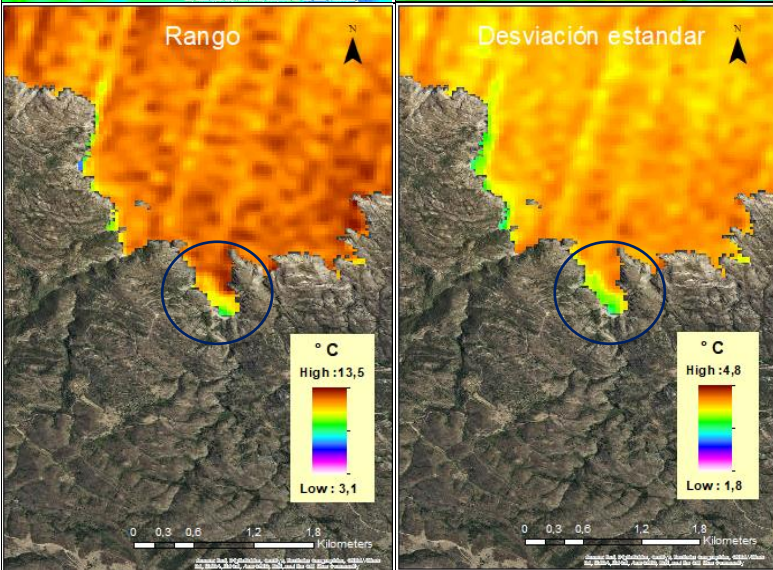
Escena 2		Datos
		<b>Lloret de Mar</b>
		Coordenadas UTM: 487999.63 m E, 4616444.85 m N
		Unidad Hidrogeológica: Al luvials de la baixa costa Brava
		Provincia: Gerona
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 5 imágenes. Correspondientes a la estación de primavera y otoño. (ID: 2, 4,5, 7,11. Tabla 1)
		<b>La Selva de Mar</b>
		Coordenadas UTM: 516254.84 m E, 4687098.31 m N
		Unidad Hidrogeológica: Al luvials de l'Albera i Cap de Creus
		Provincia: Gerona
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 5 imágenes. Correspondientes a la estación de primavera y otoño. (ID: 2, 4,5, 7,11. Tabla 1)

Tabla 10. SGD localizado en Lloret de Mar y La Selva de Mar.

La tabla 10, presenta la SGD localizada en Lloret de Mar, cuyas medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 4.3 a 4.6°C y de 2.3 a 2.6°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores correspondientes a una dispersión de datos de 0.3°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma moderada respecto a la temperatura ambiente. A nivel de rango y desviación estándar se puede visualizar plumas ligeramente definidas de 2 y 3 hectáreas aproximadamente. Respecto a la temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 15 a 16°C. Para la SGD en mención no se cuenta con datos de estudios previos. La ubicación en mención comprende a un acuífero generalmente extenso, muy permeable y productivo con predominio de acuíferos porosos en medios aluviales y coluviales, con porosidad intergranular (ACA, 2005).



Para la SGD localizada en La Selva de Mar (tabla 10), las medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 6.4 a 6.7°C y de 2.7 a 3°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores correspondientes a una dispersión de datos de 0.3°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma moderada respecto a la temperatura ambiente. A nivel de rango y desviación estándar se puede visualizar plumas ligeramente definidas de 1 y 4 hectáreas aproximadamente. Respecto a temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 13.2 a 13.4°C. Cabe indicar que no se cuenta con datos de estudios previos para la localización en mención. La ubicación de SGD comprende a un acuífero generalmente extenso, muy permeable y productivo con predominio de acuíferos porosos en medios aluviales y coluviales, con porosidad intergranular (ACA, 2005).

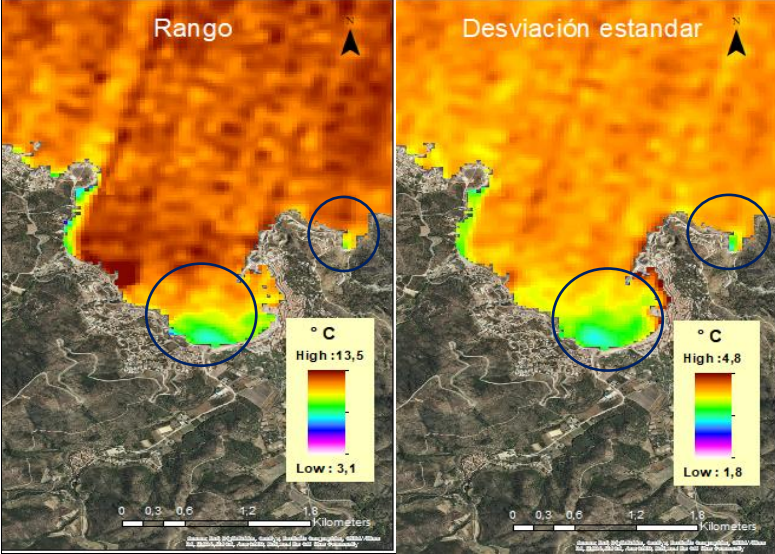
Escena 2		Datos
		<b>La Selva de Mar</b>
		Coordenadas UTM: 516254.84 m E, 4687098.31 m N
		Unidad Hidrogeológica: Al luvials de l'Albera i Cap de Creus
		Provincia: Gerona
		Comentario: Medidas estadísticas obtenidas a partir de 5 imágenes. Correspondientes a la estación de primavera y otoño. (ID: 2, 4,5, 7,11. Tabla 1)

Tabla 11. SGD localizado en Port de la Selva.

La tabla 11, presenta la SGD localizada en Port de la Selva, cuyas medidas estadísticas resultantes de rango y desviación estándar oscilan de 6.2 a 6.7°C y de 2.6 a 2.9°C respectivamente. El hecho de obtener estos valores correspondientes a una dispersión de datos de 0.5 y 0.3°C, implica que el área está influenciada por una SGD a temperatura constante que varía de forma moderada respecto a la temperatura ambiente. A nivel de rango y desviación estándar se puede visualizar plumas ligeramente definidas de aproximadamente 26 hectáreas. Respecto a la temperatura media se obtuvo valores que oscilan de 12 a 13°C. Cabe indicar que para la SGD en mención solo se tiene datos respecto a localización (Bakalowicz, 2018), pero no se cuenta con datos de estudios previos respecto a temperatura, salinidad u otro aspecto. La localización en mención comprende a un acuífero generalmente extenso muy permeables y productivo con predominio de acuíferos porosos en medios aluviales y coluviales; con porosidad intergranular (ACA, 2005).

## 5. CONCLUSIONES

La imagen térmica (B10) de Landsat 8, complementada con las medidas estadísticas resultó ser de gran utilidad para la localización de zonas de SGD. Los resultados fueron muy satisfactorios con un total de doce zonas de SGD localizadas. De estas zonas localizadas, cinco coincidieron con estudios anteriores, ubicadas en Alcocebre, Torre Badum, Peñíscola y Montsia Mar; Los cuales corresponden a la costa de Castellón y Tarragona.

La metodología aplicada en lo referente a las medidas estadísticas de rango y desviación estándar, permitió en gran medida la localización de las zonas de SGD. En este sentido cabe indicar que el potencial de estas medidas estadísticas ya fueron testeadas en estudios anteriores, lo cual se valoró en este trabajo.

El uso de imágenes en diferentes niveles (pre-filtro), pasando de las 14 imágenes a 9 o 5 según sea el caso, ha permitido localizar un mayor número de zonas de SGD. Este hecho se debe a que las imágenes preseleccionadas corresponden a aquellos que aportan datos y/o muestran indicios de SGD. Y que tras el cálculo de las medidas estadísticas se logró el objetivo de localizar zonas de SGD.

Los valores bajos en la dispersión de datos para el rango, oscilaron de 0.2 a 0.3°C, el cual implicó zonas de SGD difusa con superficies menores a 5 hectáreas; en el cual la temperatura varía de forma insignificante respecto a la temperatura ambiente. Los valores medios oscilaron de 0.3 a 0.5°C, el cual hace referencia a zonas de SGD con plumas ligeramente definidas, con superficies de hasta 26 hectáreas; en el cual la temperatura varía de forma moderada respecto a la temperatura ambiente. Los valores altos oscilaron de 0.5 a 3.8°C, el cual hace referencia a zonas de SGD con plumas definidas, con superficies de hasta 49 hectáreas; en el cual la temperatura varía de forma significativa respecto a la temperatura ambiente. Caso similar se dio en los valores bajos, medio y altos para la desviación estándar; los cuales oscilaron entre 0.1 a 0.2°C, 0.2 a 0.3°C y 0.3 a 1.1°C respectivamente. Estos valores mostraron la misma relación con la temperatura, el tipo y la extensión de las plumas ya mencionadas para el caso del rango.

Cabe destacar que en este estudio se han podido identificar descargas tanto de acuíferos cársticos como de acuíferos sedimentarios detríticos. En este sentido, es de destacar que las 14 imágenes iniciales sin ningún tipo de pre-filtro han sido suficientes para identificar zonas de SGD en diferentes tipos de acuíferos cársticos con diferentes volúmenes de descarga. En cambio, para identificar las zonas de SGD en acuíferos sedimentarios detríticos ha sido necesario pre-filtrar las imágenes.

Cabe indicar que la SGD difusa, generalmente corresponde a acuíferos poco permeables y productivos y por ende a caudales de descarga menores  $[(3-15) \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}]$ . La SGD con pluma ligeramente definida, generalmente corresponde a acuíferos con permeabilidad y producción moderada y por ende un caudal de descarga moderado  $[(34-83) \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}]$ . La SGD con pluma definida, generalmente corresponde a acuíferos muy permeables y productivos y por ende caudales de descarga mayores  $[(72-190) \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}]$ .

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACA, 2005. Caracterización de masas de Agua y análisis de riesgo como complemento de la directiva Marco del Agua (2000/60/CE). *Agencia Catalana del Agua*, Issue 1, pp. 8-21.
- Antón-Pacheco, C. y otros, 2007. Identificación y cartografía de surgencias costeras en el acuífero kárstico de El Maestrazgo (Castellón) mediante técnicas de teledetección aeroportada en el infrarrojo térmico. *Boletín Geológico y Minero*, 118(Especial), pp. 649-670.
- Bakalowicz, M., 2018. Coastal Karst Groundwater in the Mediterranean: A Resource to Be Preferably Exploited Onshore, Not from Karst Submarine Springs. *Geosciences*, pp. 2-12.
- Becker, M. W., 2006. Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water. *Groundwater*, 44(2), p. 306–18.
- Boehm, A. B., Shellanbarger, G. G. & Paytan, A., 2004. Groundwater discharge: Potential association with fecal indicator bacteria in the surfzone. *Environment Science & Technology*, Volumen 38, pp. 3558-3566.
- Bokuniewicz, H., 1992. Analytical descriptions of subaqueous groundwater seepage.. 15(4), p. 458–464.
- Boudreau, B., 1997. Diagenetic Models and Their Implementation Modelling.
- Burnett, W. C. & Dulai, H., 2003. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous Radon-222 measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, 69(1), pp. 21-35.
- Chander, G. & Markham, B., 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), p. 2674–2677.
- Congedo, L., 2019. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Versión 6.2.0.1. pp. 56-57.
- DOGC, 1988. *Diario Oficial de la Generalidad de Catalunya*. [En línea] Available at: <https://dogc.gencat.cat/es> [Último acceso: 5 Abril 2019].
- García-Solsona, E. y otros, 2010. Groundwater and nutrient discharge through karstic coastal springs (Castelló, Spain). *Biogeosciences*, Volumen 7, pp. 2625-2638.
- GenCat, 2017. *Generalitat de Catalunya*. [En línea] Available at: <http://www.catalunya.com/clima-9-1-9?language=es> [Último acceso: 6 Abril 2019].
- Hu, C., Muller-Karger, F. E. & Swarzenski, P. W., 2006. Hurricanes, submarine groundwater discharge and Florida's red tides.. *Geophysical Research Letters*, Volumen 33, p. L11601.
- Jimenez-Munoz, J. C. & Sobrino, J. A., 2010. A Single-Channel Algorithm for Land-Surface Temperature Retrieval From ASTER Data IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Volumen 7, pp. 176-179.

- Johannes, R. E., 1980. The ecological significance of the submarine discharge of ground- water. *Marine Ecological Progress Series*, Volumen 3, pp. 365-373.
- Lee, Y. W. y otros, 2009. Nutrient inputs from submarine groundwater discharge (SGD) in Masan Bay, an embayment surrounded by heavily industrialized cities, Korea. *The Science of the Total Environment*, 407(1), pp. 3181-3188.
- Llebot, C. y otros, 2014. Hydrodynamic states in a wind-driven microtidal estuary (Alfacs Bay). *Journal of Sea Research*, Volumen 85, pp. 263-276.
- Mallast, U. y otros, 2014. How to identify groundwater-caused thermal anomalies in lakes based on multi-temporal satellite data in semi-arid regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, Volumen 18, pp. 2773-2787.
- Mejías, M. y otros, 2012. Methodological study of submarine groundwater discharge from a karstic aquifer in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Hydrology*, Volumen 27, pp. 464-465.
- Mejías, M. y otros, 2008. Methodology of hydrogeological characterization of deep carbonate aquifers as potential reservoirs of groundwater. Case of study: The Jurassic aquifer of El Maestrazgo (Castellón, Spain). *Environ. Geol*, 54(3), p. 521-536.
- Mohr, P. J., Newell, D. B. & Taylor, B. N., 2015. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014 National Institute of Standards and Technology, Committee on Data for Science and Technology.
- Moore, W. S., 1999. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water. *Marine Chemistry*, 65(1), pp. 111-125.
- Moran, M., Jackson, R., Slater, P. & Teillet, P., s.f. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output Remote Sensing of Environment. Volumen 41, pp. 169-184.
- NASA, 2011. Landsat 7 Science Data Users Handbook Landsat Project Science Office at NASA's Goddard Space Flight Center in Greenbelt. pp. 186-187.
- Office, L. P. S., 2003. Landsat 7 Science Data User's handbook. NASA Washington, D.C: Goddard Space Flight Centre.
- Rodellas, V. y otros, 2012. Quantifying groundwater discharge from different sources into a Mediterranean wetland by using  $^{222}\text{Rn}$  and  $\text{Ra}$  Isotopes. *Journal of Hydrology*, Volumen 11, pp. 466-467.
- Shaban, A., Khawlie, M., Abdallah, C. & Faour, G., 2005. Geologic controls of submarine groundwater discharge: Application of remote sensing to north Lebanon. *Environmental Geology*, Volumen 47, pp. 512-522.
- Slomp, C. P. & Van Capellen, P., 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *Journal of Hydrology*, Volumen 295, pp. 64-86.
- Trezzi, G. y otros, 2017. Assessing the role of submarine groundwater discharge as a source of Sr to the Mediterranean Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , Volumen 200, pp. 42-54.

UNESCO, 2004. Submarine groundwater discharge: management implications, measurements and effects. IHP-VI series on groundwater; IOC. Manuals and guides. 5(44).

Yeung, K. W., 2002. Path Analysis Using ArcGIS Web API: UAE Data Perspectives. *Science and education*, 3(1), pp. 2012-2016.